

## Bibliography

1. Лифанов И. К. О произведении одномерных сингулярных интегральных операторов // Теория функций, функциональный анализ и их приложения. – Харьков : Изд. ХГУ, 1984. – Вып. 42. – С. 67 – 71.
2. Гандель Ю. В., Полянская Т. С. Математические вопросы метода дискретных зарядов. Учеб. пособие. Ч. I. – Харьков : Изд. ХГУ, 1991. – 67 с.
3. Гандель Ю. В. Лекции о численных методах для сингулярных интегральных уравнений. Учеб. пособие. Ч. I. – Харьков : Изд. ХНУ им. В. Н. Каразина, 2001. – 92 с.
4. Лифанов И. К. О некорректности и регуляризации численного решения сингулярных интегральных уравнений первого рода // ДАН СССР. – 1980. – Т. 255. – № 5. – С. 1046 – 1050.
5. Натансон И. П. Конструктивная теория функций. – М. – Л. : ГТТИ, 1949. – 688 с.
6. Габдулхаев Б. Г. Оптимальные аппроксимации решений линейных задач. – Казань : Изд. Казанск. ун-та, 1980. – 231 с.

## References (transliterated)

1. Lifanov I. K. O proizvedenii odnomernykh singulyarnykh integral'nykh operatorov [On the product of one dimensional singular integral equations]. *Teoriya funktsiy, funktsional'nyy analiz i ikh prilozheniya* [Theory of functions, functional analysis, and their applications]. Kharkov, Kharkov State University Publishing, 1984, vol. 42, pp. 67–71.
2. Gandel Y. V., Polyanskaya T. S. *Matematicheskiye voprosy metoda diskretnykh zaryadov. Ucheb. posobiye. Ch. I* [Mathematical problems of the method of discrete charges. Tutorial. Part I]. Kharkov, Kharkov State University Publ., 1991. 67 p.
3. Gandel Y. V. *Lekzii o chislennykh metodakh dlya singulyarnykh integral'nykh uravneniy. Ucheb. posobie. Ch. I* [Lectures on numerical methods for singular integral equations. Textbook. Part I]. Kharkov, V. N. Karazin Kharkov National University Publ., 2001. 92 p.
4. Lifanov I. K. O nekorrektnosti i regularizatsii chislennogo resheniya singulyarnykh integral'nykh uravneniy pervogo roda [On ill-posedness and regularization of numerical solution to first kind singular integral equation]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the Academy of Science of the USSR]. 1980, vol. 255, no. 5, pp. 1046–1050.
5. Natanson I. P. *Konstruktivnaya teoriya funktsiy* [Constructive theory of functions]. Moscow – Leningrad, State Publishing of Technical and Theoretical Literature (GTTI), 1949. 688 p.
6. Gabdulkhaev B. G. *Optimal'nye approksimazii resheniy lineynykh sadach* [Optimal approximation of solutions to linear problems]. – Kazan, Kazan. University Publ., 1980. 231 p.

Received (носупила) 06. 09.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Полянська Тетяна Семенівна (Полянская Татьяна Семеновна, Polyanskaya Tatyana Semenovna)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (093) 921-97-17; e-mail: tpolyanskaya1@gmail.com.

**Набока Олена Олексіївна (Набока Елена Алексеевна, Naboka Olena Oleksiyivna)** – кандидат фізико-математичних наук, старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (097) 961-81-16; e-mail: lena622651@gmail.com.

УДК 621.923

**В. И. ПОЛЯНСКИЙ****МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ УПРУГИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

На основе разработанной математической модели управления упругими перемещениями при механической обработке показано, что с точки зрения повышения производительности и точности размера обработки при точении с низкой жесткостью технологической системы целесообразно сьем припуска производить за один проход инструмента или использовать упругую схему шлифования с фиксированным радиальным усилием. Для достижения высокой точности формы обрабатываемой поверхности и повышения производительности обработки необходимо сьем припуска производить по схемам многопроходной обработки абразивными и лезвийными инструментами. Аналитически установлена эффективность применения в этом случае лезвийной обработки, в особенности инструментами из синтетических сверхтвердых материалов, обеспечивающих снижение интенсивности трения в зоне резания и соответственно повышение точности и производительности обработки по сравнению с процессом шлифования.

**Ключевые слова:** упругое перемещение, технологическая система, точность обработки, производительность обработки, точение, шлифование, инструмент, трение.

**В. І. ПОЛЯНСЬКИЙ****МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПРУЖНИМИ ПЕРЕМІЩЕННЯМИ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ**

На основі розробленої математичної моделі управління пружними переміщеннями при механічній обробці показано, що з точки зору підвищення продуктивності та точності розміру обробки при точінні з низькою жорсткістю технологічної системи доцільно зняття припуску здійснювати за один прохід інструменту або використовувати пружну схему шліфування з фіксованим радіальним зусиллям. Для досягнення високої точності форми оброблюваної поверхні та підвищення продуктивності обробки необхідно зняття припуску здійснювати за схемами багатоходової обробки абразивними та лезовими інструментами. Аналітично встановлено ефективність застосування в цьому випадку лезової обробки, особливо інструментами з синтетичних надтвердих матеріалів, що забезпечують зниження інтенсивності тертя в зоні різання й відповідно підвищення точності та продуктивності обробки порівняно з процесом шліфування.

**Ключові слова:** пружне переміщення, технологічна система, точність обробки, продуктивність обробки, точіння, шліфування, інструмент, тертя.

© В. И. Полянский, 2018

V. I. POLYANSKY

## MATHEMATICAL MODEL OF ELASTIC MOVEMENT MANAGEMENT IN MECHANICAL PROCESSING

Based on the developed mathematical model of controlling elastic displacements during machining, it is shown that from the point of view of increasing productivity and precision of machining size when turning with low rigidity of the technological system, it is advisable to remove the allowance in one tool pass or use an elastic grinding scheme with fixed radial force. To achieve high accuracy of the shape of the surface processed and to increase the productivity of the treatment, it is necessary to remove the allowance using multi-pass processing schemes with abrasive and blade tools. Calculations established the effectiveness of blade cutting in this case, especially with tools made of synthetic superhard materials, which provide reduction of friction intensity in the cutting zone and, consequently, increase in the accuracy and productivity of the treatment compared to the grinding process. It is also proposed to use a progressive scheme of high-speed milling of holes on modern machine tools with CNC machining center type using carbide mills with wear-resistant coatings of foreign production.

**Key words:** elastic movement, technological system, machining accuracy, machining productivity, turning, grinding, tool, friction.

**Введение.** Обеспечение высоких показателей качества, точности и производительности при механической обработке является основным условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Это требует применения новых эффективных технологий, современных металлорежущих станков с ЧПУ и сборных твердосплавных и керамических режущих инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства. В настоящее время на предприятиях Украины накоплен определенный опыт в данном направлении, что позволило повысить эффективность производства. Однако для более полного использования технологических возможностей нового оборудования и инструментов необходимо располагать новыми знаниями о закономерностях осуществления эффективных методов механической обработки: условиях уменьшения силы и температуры резания, повышения показателей качества, точности и производительности обработки и т.д. Все это требует проведения теоретического анализа технологических закономерностей процесса резания. В связи с этим в работе приведена математическая модель управления упругими перемещениями, возникающими в технологической системе при механической обработке, позволяющая определить основные направления повышения точности и производительности обработки.

**Анализ последних исследований.** Проблеме математического моделирования упругих перемещений, возникающих в технологической системе при механической обработке, в научно-технической литературе уделено достаточно большое внимание [1, 2] и в основном при шлифовании [3, 4]. Это позволяет научно обоснованно подходить к выбору оптимальных условий обработки с учетом ограничения по точности обрабатываемой поверхности. Вместе с тем, с применением на предприятиях Украины современных металлорежущих станков с ЧПУ и твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства появилась возможность повышения точности и производительности обработки, что требует изыскания новых технологических решений для их практической реализации. Учитывая сказанное выше, актуальной задачей является теоретический анализ условий высокоточной механической обработки деталей машин.

**Постановка задачи.** Для определения технологических возможностей эффективного применения современных режущих лезвийных инструментов на финишных операциях необходимо разработать математическую модель управления упругими перемещениями при механической обработке и на ее основе аналитически описать основные параметры точности обрабатываемых поверхностей деталей: точность размера и точность формы, которые, как правило, определяются упругими перемещениями, возникающими в технологической системе. Использование полученных аналитических зависимостей позволит установить условия повышения точности и производительности обработки на финишных операциях и оценить возможность эффективного перехода от традиционно применяемого процесса шлифования к более эффективной финишной лезвийной обработке.

**Математическая модель.** Упругое перемещение, возникающее в технологической системе при механической обработке, обусловлено действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , которая при продольном тчении с учетом зависимости для определения коэффициента резания  $K_{рез} = P_z \cdot \cos \varphi / P_y$  выражается [1]:

$$P_y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t \cdot \cos \varphi}{K_{рез}} = \frac{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot V}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $P_y$ ,  $P_z$  – соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н;  $S$  – подача, м/об.;  $t$  – глубина резания, м;  $\varphi$  – главный угол резца в плане;  $Q = S \cdot t \cdot V$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $V$  – скорость резания, м/с.

Тогда упругое перемещение  $y$ , возникающее в технологической системе, определится:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез} \cdot V}, \quad (2)$$

где  $c$  – приведенная жесткость технологической системы, Н/м.

Из зависимости (2) вытекает, что уменьшить упругое перемещение  $y$  и повысить точность обработки при продольном точении можно уменьшением параметров  $\sigma$ ,  $Q$  и увеличением  $c$ ,  $K_{рез} = P_z / P_y$ ,  $V$ ,  $\varphi$ . Следовательно, увеличить величину  $y$  можно, главным образом, на окончательных операциях обработки с относительно небольшой производительностью. Применение режущих лезвийных инструментов из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ) с увеличенной скоростью резания на полустиховых операциях также позволяет уменьшить величину  $y$ . Однако при резании с небольшой толщиной среза увеличивается условное напряжение резания  $\sigma$  и уменьшается коэффициент  $K_{рез} = P_z / P_y$ , что ограничивает возможности уменьшения величины  $y$ .

При шлифовании в зависимости (2) вместо скорости резания  $V$  необходимо рассматривать скорость шлифовального круга  $V_{кр}$ , которая, как известно, больше скорости резания при лезвийной обработке. Это потенциально позволяет добиться меньших значений величины  $y$ . Вместе с тем, при шлифовании (по сравнению с точением) условное напряжение резания  $\sigma$  принимает большие значения в связи с интенсивным трением связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. Поэтому основным условием осуществления процесса высокоэффективного шлифования следует рассматривать обеспечение высокой режущей способности круга, снижение трения связки круга с обрабатываемым материалом. Это достигается применением высокопористых, импрегнированных и прерывистых абразивных кругов, а также алмазных кругов на относительно мягких связках, работающих в режиме интенсивного самозатачивания и обеспечивающих снижение силы и температуры резания [5].

Для более точного расчета упругого перемещения  $y$  при продольном точении следует воспользоваться уравнением равновесия технологической системы, находящейся под действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и упруго-восстанавливающей силы  $c \cdot y$ :

$$\frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез}} \cdot (t - y_1) = c \cdot y_1. \quad (3)$$

Тогда величина упругого перемещения на первом проходе инструмента  $y_1$  равна:

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (4)$$

При условии  $\frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \gg 1$  зависимость (4) принимает вид зависимости (2). Следовательно, чем больше выражение  $\frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$ , тем меньше упругое перемещение  $y_1$  и выше точность обработки. Знаменатель зависимости (4) определяет уточнение на размер  $\varepsilon = t / y_1$  [6].

При втором и третьем проходах инструмента величины упругого перемещения  $y_2$  и  $y_3$  с учетом зависимости (4) выражаются:

$$y_2 = \frac{t + y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}; \quad (5)$$

$$y_3 = \frac{t + y_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^3}. \quad (6)$$

В итоге пришли к геометрической прогрессии со знаменателем  $q = \frac{1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}$ . Как видно, с увеличе-

нием количества проходов инструмента  $n$  величина упругого перемещения  $y_n$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению, определяемому суммой бесконечной геометрической прогрессии:

$$y_n = t \cdot \left(\frac{a_1}{q-1}\right) = \frac{t}{\left(\frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}, \quad (7)$$

где  $a_1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}$  – первый член геометрической прогрессии.

**Анализ теоретического решения и определение рациональных условий обработки.** Сравнивая зависимости (7) и (4), видно, что при первом проходе инструмента упругое перемещение  $y_1$  меньше, чем при  $n$ -ом проходе (то есть  $y_1 < y_n$ ). Следовательно, эффективно сьем всего припуска при продольном точении осуществлять за один проход инструмента. Это позволит уменьшить величину упругого перемещения, возникающего в технологической системе, и соответственно повысить точность и производительность обработки.

В особой мере это относится к процессу шлифования, где величина

$$\frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S} < 1$$

и упругие перемещения  $y_1$  и  $y_n$  существенно отличаются. Поэтому при шлифовании с относительно низкой жесткостью технологической системы необходимо исключить переходной процесс, описываемый геометрической прогрессией. Это достигается, например, применением упругой схемы шлифования с постоянным радиальным усилием  $P_y = c \cdot y_n$ , определяемым из зависимости (7), что идентично зависимости (2) при условии  $\varphi = 0$ . В результате повышается производительность обработки, то есть, по сути, в процессе шлифования реализуется условие (7), определяющее установившийся во времени процесс обработки.

Таким образом, показано, что при предварительной высокопроизводительной обработке целесообразно сьем всего припуска осуществлять за один продольный ход инструмента. При окончательной обработке, когда необходимо обеспечить высокую точность формы обрабатываемой поверхности, следует сьем припуска осуществлять за несколько продольных ходов инструмента, управляя величиной упругого перемещения, возникающего в технологической системе, в соответствии с геометрической прогрессией. Например, при растачивании отверстия (при несовпадении осей вращающегося инструмента и обрабатываемого отверстия на величину  $\Delta$ ) разность наибольшего  $y_1$  и наименьшего  $y_2$  упругого перемещений в двух противоположных направлениях при первом проходе инструмента в соответствии с зависимостью (4) равна [7]:

$$\Delta y_1 = y_1 - y_2 = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} - \frac{t_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{2\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}, \quad (8)$$

где  $t_1 = t + \Delta$  – максимальная фактическая глубина резания, м;  $t_2 = t - \Delta$  – минимальная фактическая глубина резания, м.

При втором проходе инструмента:

$$\Delta y_2 = \frac{t + y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} - \frac{t + y_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{y_1 - y_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{2\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}. \quad (9)$$

При  $n$ -ом проходе инструмента:

$$\Delta y_n = \frac{2\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}. \quad (10)$$

Как следует из зависимости (10), с увеличением количества проходов инструмента  $n$  величина  $y_n$  стремится к нулю, и погрешность формы обрабатываемого отверстия в виде неосесимметричности устраняется, причем, с увеличением выражения  $\frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} > 1$  – более интенсивно. Следовательно, при лезвийной обработке,

характеризующейся большими значениями выражения  $\frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} > 1$ , можно значительно быстрее добиться за-

данной точности формы обрабатываемой поверхности, чем при шлифовании ( $\frac{c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} < 1$ ). Этим объясняется

эффективность применения процесса растачивания отверстий, в особенности резцами из СТМ, которые характеризуются высокой твердостью и остротой режущей кромки. Значительными технологическими возможностями в этом направлении располагает прогрессивная схема высокоскоростного расфрезерования отверстий [8], получившая достаточно широкое применение в последние годы в связи с использованием на предприятиях современных металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и твердосплавных режущих инструментов (фрез) с износостойкими покрытиями зарубежного производства. Целесообразно также применение для обработки отверстий схемы многопроходного внутреннего шлифования абразивными кругами, которые ха-

рактизуются относительно низкой интенсивностью трения в зоне резания и повышенной режущей способностью. Как следует из зависимости (4), в этом случае за счет уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$  можно уменьшить величину упругого перемещения в технологической системе и повысить точность и производительность обработки.

Для более полного представления о технологических возможностях высокоточной обработки отверстий следует теоретически определить величину погрешностей обработки при рассверливании (сверлом с двумя лезвиями) со смещением оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия на величину  $\Delta$ . В этом случае уравнение равновесия технологической системы, находящейся под действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и упруго-восстанавливающей силы  $c \cdot y$ , принимает вид:

$$\frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез}} \cdot (t + \Delta - y) - \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез}} \cdot (t - \Delta - y) = c \cdot y. \quad (11)$$

Откуда

$$y = \frac{2 \cdot \Delta}{\left( \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)}. \quad (12)$$

В результате величина неосесимметричности  $\Delta_1$  сверла и обработанного отверстия определится:

$$\Delta_1 = \Delta - y = \Delta \cdot \left[ 1 - \frac{2}{\left( \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)} \right]. \quad (13)$$

Как видно, чем больше знаменатель второго слагаемого зависимости (13), тем больше величина  $\Delta_1 \rightarrow \Delta$ . Это условие выполняется при повышенной жесткости технологической системы и небольших значениях  $\sigma$  и  $S$ , то есть при обеспечении высокой режущей способности сверла. В противном случае, то есть при увеличенной податливости технологической системы, величина  $\Delta_1 \rightarrow 0$ , и обрабатываемое отверстие будет принимать форму овала, что, естественно, снижает точность обработки. Из этого следует, что повысить точность обработки отверстия можно увеличением жесткости технологической системы  $c$ , угла в плане сверла  $\varphi$  и уменьшением  $\sigma$  и  $S$ . Повысить точность обработки также можно повторным прохождением сверла большего диаметра.

Сравнивая зависимости (8) и (12), видно, что они фактически одинаковы при растачивании и рассверливании отверстия. Однако в зависимости (8) знаменатель больше, поэтому при растачивании будут меньше погрешности обработки отверстия, чем при его рассверливании, что подтверждается практическими данными. Этим можно объяснить эффективность применения растачивания для обработки высокоточных отверстий.

**Перспективы дальнейших исследований.** Автор считает перспективными пути исследования, связанные с определением технологических возможностей повышения точности и производительности обработки за счет применения перспективного метода – высокоскоростного расфрезерования отверстий, обеспечивающего уменьшение силы и температуры резания.

**Выводы.** В работе на основе разработанной математической модели управления упругими перемещениями, возникающими в технологической системе при механической обработке, теоретически обоснованы основные направления повышения точности и производительности. Теоретически доказана эффективность применения на финишных операциях современных режущих лезвийных инструментов, позволяющих уменьшить интенсивность трения в зоне резания и обеспечить высокоточную и высокопроизводительную обработку. Обоснованы условия повышения точности и производительности обработки отверстий методом рассверливания.

#### Список литературы

1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. «Механика резания материалов». – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с.
2. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
3. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л. : Машиностроение, 1984. – 103 с.
4. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов, 1979. – 232 с.
5. Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с.
6. Маталин А. А. Технология машиностроения: учебник. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
7. Полянский В. И. Расширение технологических возможностей повышения точности механической обработки отверстий // Перспективні технології та прилади : Збірник наукових праць. – Луцьк : Луцький НТУ, 2017. – №11 (2). – С. 87 – 92.
8. Рябенков І. О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Одеса, 2009. – 21 с.

## References (transliterated)

1. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya. V desyati tomakh. Vol. 1. "Mekhanika reza-niya materialov"* [Physical and mathematical theory of material processing and engineering technology. In ten volumes. Vol. 1. «Mechanics of material cutting»]. Ed. F. V. Novikov, A. V. Yakimov. Odessa, ONPU Publ., 2002. 580 p.
2. Novikov F. V. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki* : monografiya [Fundamentals of Mathematical Modeling of Technological Processes of Mechanical Processing : Monograph]. Dnepr, LIRA Publ., 2018. 400 p.
3. Lur'ye G. B. *Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya* [Progressive methods of external round grinding]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 103 p.
4. Novoselov Yu. K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [Dynamics of formation of surfaces during abrasive machining]. Saratov, 1979. 232 p.
5. Yakimov A. V. *Abrazivno-almaznaya obrabotka fazonnykh poverkhnostey* [Abrasive-diamond processing of shaped surfaces]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 212 p.
6. Matalin A. A. *Tekhnologiya mashinostroyeniya : uchebnik* [Engineering Technology : textbook]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1985. 496 p.
7. Polyanskiy V. I. Rasshireniye tekhnologicheskikh vozmozhnostey povysheniya tochnosti mekhanicheskoy obrabotki otverstiy [Expansion of technological capabilities to improve the accuracy of machining holes]. *Perspektivny tekhnologii ta prylady : Zbirnyk naukovykh prats'* [Perspective technologies and devices: Collection of scientific works]. Luts'k, Luts'kyy NTU Publ., 2017, no. 11 (2), pp. 87–92.
8. Ryabenkov I. O. *Pidvyshchennya efektyvnosti finishnoyi obrobky detaley gidroaparatury na osnovi vyboru ratsional'noyi struktury i parametriv operatsiy: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : spets. 05.02.08 "Tekhnologiya mashynobuduvannya"* [Increasing the efficiency of finishing the details of hydroequipment on the basis of the choice of rational flow and operation parameters: author's abstract, dis. Candidate Tech. Sciences : specialty 05.02.08 "Technology of mechanical engineering"]. Odesa, 2009. 21 p.

Поступила (received) 17.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich)** – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ООО «Імперія металлов», м. Харків; тел.: (067) 578-09-06; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

УДК 631.37

**О. Ю. РЕБРОВ**

## РОЗПОДІЛ ДОПУСТИМОГО ТИСКУ НА ҐРУНТ ХОДОВИХ СИСТЕМ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ ЗА ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ

Запропоновано методику оцінки впливу на ґрунт ходових систем колісних тракторів згідно встановленому розподілу за територією України допустимого тиску на ґрунт колісних тракторів відповідно до вимог стандарту та урахуванням особливостей ґрунто-кліматичних умов та фактичних середньобагаторічних параметрів вмісту вологи в ґрунті в середньобагаторічні терміни проведення робіт під час підготовки ґрунту під ранні ярові культури навесні та під озиму пшеницю в літньо-осінній період.

**Ключові слова:** колісний трактор, ходові системи, максимальний тиск на ґрунт, допустимий тиск на ґрунт, параметри вмісту вологи в ґрунті.

**А. Ю. РЕБРОВ**

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ДАВЛЕНИЯ НА ГРУНТ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ТРАКТОРОВ ПО ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

Предложена методика оценки воздействия на почву ходовых систем колесных тракторов согласно установленному распределению по территории Украины допустимого давления на почву колесных тракторов в соответствии с требованиями стандарта и учетом особенностей почвенно-климатических условий и фактических среднесезонных параметров содержания влаги в пашне в среднесезонные сроки проведения работ при подготовке почвы под ранние яровые культуры весной и под озимую пшеницу в летне-осенний период.

**Ключевые слова:** колесный трактор, ходовые системы, максимальное давление на грунт, допустимое давление на грунт, параметры содержания влаги в пашне.

**О. YU. REBROV**

## DISTRIBUTION OF ADMISSIBLE PRESSURE OF RUNNING GEARS OF COLLECTOR TRACTORS ON THE SOIL THROUGHOUT THE TERRITORY OF UKRAINE

The paper proposes a methodology for estimating the impact on the soil of the running systems of wheeled tractors according to the established distribution throughout the territory of Ukraine of permissible pressure on the soil in accordance with standard requirements and taking into account the peculiarities of soil and climatic conditions and the actual long-term average moisture content parameters in arable land during the long-term average work period of preparing the soil for early spring crops and under winter wheat in the summer-autumn period. The maximum pressure on the soil for modern tires of agricultural tractors is in the range of 78 – 177 kPa. At such a maximum pressure, the probability of a tire fulfilling the requirements of the standard for the performance of running gears on the soil will be in the range from 0.078 – 0.104 to 0.698 – 0.730. It is necessary to use conversion track systems or crawler tractors to ensure an impact on the soil within the limits of permissible in the cultivation of agricultural land, the area of which is more than 27 – 30 % of Ukraine's territory. The use of conversion track systems allows to reduce the maximum pressure on the soil by 65 %, which greatly improves the environmental friendliness of the tractors.

**Key words:** wheeled tractor, running gears, maximum pressure on the soil, permissible pressure on the soil, parameters of moisture content in arable land.

© О. Ю. Ребров, 2018